# 海底トンネル周辺地盤の透水性低下に伴う 覆工の力学的挙動に関する考察

深沢 成年1·柏木 亮2·西藤 潤3

<sup>1</sup>フェロー会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構(〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1) E-mail:nar.fukazawa@jrtt.go.jp

<sup>2</sup>正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構(〒231-8315横浜市中区本町6-50-1) E-mail:ryo.kashiwagi@jrtt.go.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1) E-mail:saito.jun.3n@kyoto-u.ac.jp

青函トンネルは、最深部が海面下240mに位置し、海水がトンネル湧水として作用することから、建設時には事前薬液注入により周辺地盤の透水性を低下させ掘削を行うとともに、建設後は基本的に覆工に高水圧が直接作用しない構造となっている。一方、坑内湧水量は年々減少する中、内空変位は徐々にではあるものの大きくなっており、周辺地盤の透水性低下と覆工の挙動の関連性を検討することで、将来に亘るトンネルの健全性を明らかにする必要がある。そこで本研究では、周辺地盤の透水性変化がトンネルに及ばす影響についてモデル化し、解析を行った。その結果、トンネル断面の変形モード、覆工応力ともに計測結果とほぼ同様の傾向を示す解析結果が得られた。

Key Words: undersea tunnel, permeability decrease, lining stress, lining displacement

# 1. 緒論

津軽海峡下で本州と北海道を結ぶ青函トンネルは、最深部が海面下240mに位置する延長53.9km(海底区間23.3km)の長大海底鉄道トンネルとして、1988年3月に在来線が開業、2016年3月には北海道新幹線の路線としても使用されることとなった、国内の旅客・貨物輸送の根幹とも言える土木構造物である(図-1).

一般に海底トンネルの建設及び維持管理においては、無尽蔵の海水とそれに伴うトンネル周辺に作用する大きな間隙水圧の対策が最大の課題といえる。青函トンネルでは、2.4MPaに及ぶ高水圧と無尽蔵の海水への対策として、トンネル半径の3~5倍程度の範囲の周辺地山に事前注入を行い、透水性を低下させた注入域で水圧を受けることを基本とし、さらに注入域を通過した湧水は覆工背面で導水され、基本的には覆工に高水圧が直接作用しない構造となっている(図-2).

長期計測の結果から、現在、青函トンネルの坑内湧水 量は年々減少していることがわかっているが、一方で内 空変位は徐々にではあるものの大きくなっており、トン ネルの健全性を考える上では、湧水量と内空変位の値が 覆工にどのような影響を与えているか把握しておく必要 がある.

土谷ら<sup>1)</sup>は、湧水量の変化がトンネルの挙動に及ぼす 影響を数値解析により検討し、湧水量低下の原因が注入 域の透水性低下とした場合は覆工の健全度は確保される が、覆工背面の導水機能低下が要因であった場合、覆工 の健全性に問題が生じる可能性があることを指摘してい る. また、西藤ら<sup>2)</sup>は、周辺地盤の透水性低下のパター ンとして3つのケースを想定、モデル化し、覆工に生じ る応力状態の変化やトンネル周辺の水圧分布の変化につ いて調べている。その結果、時間に依存した周辺地盤の 透水性低下を考慮した解析により、湧水量の減少によっ てトンネル覆工の健全性はないとの結論を示している。

これらの研究では、解析により海底トンネルと周辺地盤の状況を再現し、健全性を評価しているが、得られた解析値と計測値について分析し評価しているものではない。そこで、本研究では、北海道新幹線の開業を契機に、これまでの目視による外観検査、内空変位、覆工の応力測定といいた計測結果等に加え、25年以上経過した長大海底トンネルの健全性に関して、湧水量が減少する状況下においてトンネル覆工の応力状態など力学的挙動について検討し、計測値との関係性について分析し、トンネルの健全性について考察を加える。

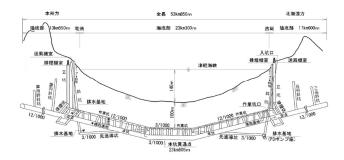
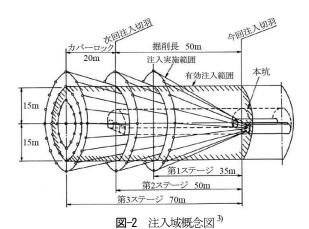


図-1 青函トンネル縦断図



## 2. 力学的挙動の検討

本研究で行った検討は、西藤ら<sup>2)</sup>が行った解析手法と同じものを用いているが、その概要を示す.

### (1) 解析の概要

周辺地盤の透水性低下に伴う覆工の力学的挙動を検討するため、湧水量の減少量をもとに周辺地盤の透水性低下をモデル化し、周辺地盤での透水性変化のパターンを想定し、覆工に生じる応力、内空変位、及びトンネル周辺の水圧分布の変化について調べた.

まず、図-3 のような海面下 240m、海底下 100mにトンネルが存在する領域を考え、対称性から右半分のみを解析領域とした.解析に用いた有限要素メッシュを図-4に示す.なお、境界条件は上側を自由表面、左右両側および下側をスライダー支持とした.水理境界条件は、上側、右側、下側を排水境界とし、左側を対称軸として非排水境界としている.

トンネル覆工および周辺地盤は弾完全塑性体として考え、2次元平面ひずみ条件下において、土-水連成有限要素解析を行う.解析で用いた物性値は表-1のとおり.

## (2) 解析の流れ

解析はトンネルの施工過程を踏まえ、図-5に示すよ

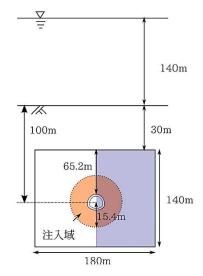


図-3 解析領域 2)

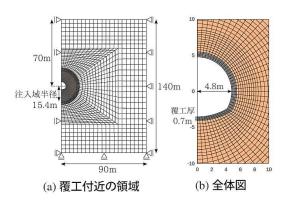


図-4 有限要素メッシュ<sup>2)</sup>

表-1 解析に用いた物性値2)

	覆工	注入域	非注入域
Young 率 [kPa]	$3.0 \times 10^{7}$	$3.0 \times 10^{5}$	$3.0 \times 10^{5}$
Poisson 比	0.20	0.33	0.33
透水係数 [m/s]	-	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-6}$
粘着力 [kPa]	$5.0 \times 10^{4}$	$5.0 \times 10^{2}$	$5.0 \times 10^{2}$
内部摩擦角	50°	30°	30°
ダイレイタンシー角	40°	20°	20°
単位体積重量 [kN/m³]	25	20	20

うに(I) 掘削段階,(Ⅱ) 覆工完成直後,(Ⅲ) 長期間経過時の3段階に分けて計算を実施した.

#### (I) 掘削段階

掘削前の地盤には等方的な全応力が作用していると仮定し、掘削段階では掘削相当外力fを応力解放係数 $\alpha$ (0< $\alpha$ <1) の分だけ解放させる。海底部は主に側壁導坑先進上部半断面工法で施工されているが、覆エコンクリート背面への裏込め注入や注入域の存在により、地山から覆エコンクリートに作用する荷重は大きく軽減されているので、応力解放率は $95\%(\alpha=0.95)$ とした。

### (Ⅱ) 覆工完成直後

覆工を建設した後, 掘削に伴い周辺地盤が緩むことか

#### ら、覆工に $(1-\alpha)$ fの力を分担させる.

#### (Ⅲ) 長期間経過時

湧水量低下を考慮し、経年とともにトンネル周辺地盤の透水性を低下させるモデルを考える。具体的には、覆工に向かって流れ込む海水に含まれる細粒分が、注入域の覆工背面側から非注入域側へ向かって目詰まりを起こし、徐々に注入域の一部で透水性が低下する状態を想定した(図-6).

## (3) 経年変化による透水係数の設定

青函トンネルの湧水量は1988 年から2010 年までの約20 年で、約23%程度減少していることから、解析では、湧水量が20 年間で約25%減少するよう透水係数を低下させた。その後さらに20 年経過して湧水量が約40%まで減少することを想定し、透水係数を低下させることで将来予測も実施した。

まず,60ヶ月でメッシュ 1 層分(0.3m) の透水係数を  $k_1$  =  $1.0 \times 10^8$  [m/s] から  $k'_1$  =  $3.5 \times 10^9$  [m/s]まで低下させる. 1 層分透水性が  $k'_1$  まで低下したら,同様にその外側の 1 層の透水性が  $k_1$  から  $k'_1$  まで低下する.上記の手順を 1 層分,つまり 1 年分行った(図1 一7).透水係数の低下する層の長さは 1 24 mである.

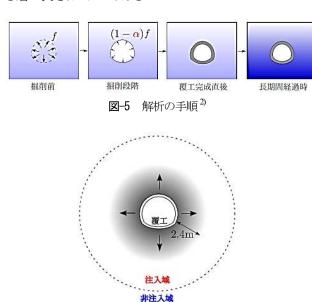
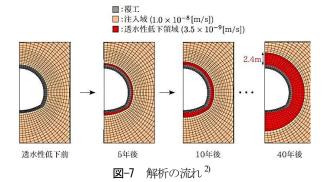


図-6 透水性低下領域の拡大イメージ2)



#### (4) 解析結果

解析では、トンネル周辺地盤の要素で透水係数を低下させ、それに起因するトンネル周辺の水圧分布、トンネル覆工の応力状態、周辺地盤の応力状態、塑性領域の変化、覆工応力、内空変位等を調べた.

解析値の要素位置を図-8に示す.トンネル覆工に作用する最大主応力,トンネルの内空変位量はそれぞれ表-2,表-3のような値となった.

最大主応力については、覆工全体に概ね20MPa前後の応力が発生しており、時間変化による透水係数の低下に伴う影響はさほど見られない結果となった。なお、下半側壁部では、20年後から40年後にかけて応力が減少傾向を示しているが、これは西藤ら<sup>2)</sup>によると、透水性低下領域が広がるにつれて間隙水圧が増加傾向から減少傾向に移行し、その分有効応力が増加したため、塑性域から弾性域に戻ったからと考えられる。

内空変位量については、透水係数の低下に伴い、徐々に値が大きくなっているものの、その変化自体は小さくなっており、40年後においても2mm以下との結果が得られた. なお、正の値は周辺地盤側への変位を、負の値はトンネル内空側への変位を表している.

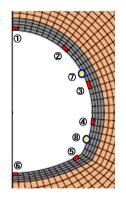


図-8 解析値の要素位置

表-2 覆工に作用する最大主応力

(単位: MPa)

			(
	1ヶ月後	20年後	40 年後
①天端部	18. 1	18.4	18.9
②上半7-7部	18.7	18. 2	18.3
③上半アーチ・下半側壁部	20. 2	19. 5	19. 1
④下半側壁部	22. 5	23.0	22. 5
⑤下半側壁・イバート部	25. 4	26. 9	26.7
⑥インバート部	11.8	9.1	10.0

表-3 内空変位量

(単位:mm)

	1ヶ月後	10年後	20 年後	30 年後	40年後
⑦上半アーチ部	0.01	-0.98	-1. 51	-1. 77	-1.87
⑧下半側壁部	0.01	0.31	0.64	0.92	1. 16

※要素変位量の倍の値としている

# 3. 解析結果と計測結果の分析

#### (1) 内空変位

青函トンネルの内空変位計測は、開業以来、陸上部分を含む80断面において、変位量の大きさや推移に応じ、現在では1~4回/年の頻度で実施している。図-9に本坑内空変位計測の側線を、図-10に水平側線の変位量の度数分布を、表-5に変形モードの分類結果を示す。なお、正負は表-3と合致している。計測結果によると、全80断面の92%の内空変位が±2mm以内(平均-0.95mm)との結果が得られている。また、上下半ともに断面内に縮小するAパターン(約50%)、上半は縮小し下半は拡大するCパターン(約40%)が大半を占めていることがわかっている。

以上より、表-3の内空変位量に着目すると、約40%の計測断面で見られる、上半は縮小し下半は拡大するCパターンと合致することから、本解析では計測結果の一般的な挙動を再現することができたものと考えている.

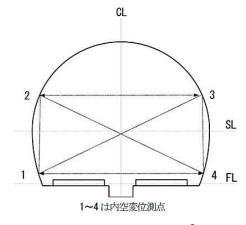


図-9 内空変位計測の側線 3)

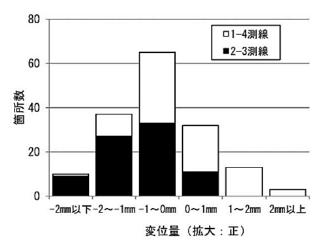


図-10 変位量の度数分布 3)

#### (2) 覆工応力

応力計測は、変位が約4mm程度と比較的大きい2断面で2005年~2010年にかけて順次実施された。覆工の応力の計測結果を図-11に、解析値と計測値を表-6に示す。表-6の計測値は平面孔底ひずみ法による二次元計測により測定された覆工内面側の値である。解析値、計測値ともに最大で約20MPaの応力が発生しているが、全体的に解析値の方が大きな値となっている。また、下半側壁部~インバート部の値には乖離が見られる。これは解析では覆工とインバートが剛結された円形構造物であるのに対し、実際の施工では青函トンネルの覆工がサイロットにより、側壁、アーチ、インバートと段階的に施工され、断面が不連続となっている点、アーチ部の荷重を側壁部で支持し、インバートには荷重が伝達しにくい形状であるのではと考えられる。また、必ずしも覆工が地山に十分密着しているものではない可能性も十分に考えられる。

#### (3) まとめ

以上より、本解析により計測結果の一般的な挙動を再 現することができたが、変位が約4mm程度と比較的大き な断面と合致する結果までは必ずしも得られていない.

表-5 内変形パターンと発生箇所数<sup>3)</sup>

	Aパターン	Bパターン	
変形パターン	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2 3	
箇所数	39 箇所	6 箇所	
	Cパターン	Dパターン	
変形パターン	2 3	2 3	
箇所数	30 箇所	5 箇所	

表-6 覆工応力の解析値・計測値

(単位:MPa)

		(     122   132   0)
	解析値 (20 年後)	計測値 (二次元)
①天端部	18. 4	5. 7
②上半アーチ部	18. 2	16. 2
③上半アーチ・下半側壁部	19. 5	7.3
④下半側壁部	23. 0	4.2
⑤下半側壁・インバート部	26. 9	4.7
⑥インバート部	9. 1	1.0

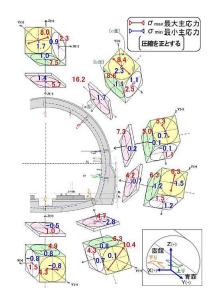


図-11 覆工の応力計測結果 (No.63 断面)<sup>3)</sup>

しかしながら、解析結果によると、覆工応力は十分に安全側の値となっており、今後湧水量が減少していったとしても応力はさほど大きくならないことが確認できた.したがって、覆工背面の導水機能が低下する等の場合を除き、実際の覆工に作用する応力が解析値を上回ることは考えにくく、内空変位及び覆工応力の値は、今後収束傾向に向かうものと想定される.

なお、青函トンネルでは、覆工の許容応力度を設計基準強度の1/3の6.0MPaとし、下半側壁とインバートはピン構造とした2次元弾性FEM解析により、健全度判定の目安となる水平側線の内空変位量を設定し維持管理を行っているが、覆工厚70cmでは、内空変位量が約6.5mmまでであれば、覆工の安全性は確保されるとの指標も存在する<sup>4</sup>. この場合においても、本解析値および計測値の結果は、問題ないことが確認できる.

# 4. 結論

青函トンネルでは、維持管理に当たり、覆エコンクリートの健全度判定の目安となる、本坑内変位量の管理目安値を一律5mmに設定している.近年の計測結果では、

管理目安値に近づいている断面が数か所存在している一方,解析結果では,開業から40年後であっても内空変位量が2mm程度(上半アーチ部)との結果が得られた.また,解析では計測断面の約40%に見られる,計測結果の一般的な挙動を再現することができた.さらに,覆工応力についても計測値と同レベルの,最大で約20MPa程度の応力が発生しているとの解析結果が得られた.

以上から、施工方法と解析モデルを完全に一致させることができなかったことにより、計測結果と解析結果の値に若干の差はあるものの、トンネル覆工の応力状態、変位等が解析により再現され、その力学的挙動のメカニズム、及び解析の妥当性を確認することができた。また、湧水量低下に伴う海底トンネルへの影響については、周辺地盤の透水性低下をモデル化することで、注入域の存在による効果が非常に大きいことを改めて確認すると同時に、これまで実施してきた計測を今後も継続的に実施していくことで、トンネルの健全性を確認できることがわかった。

今後は、施工方法と計測結果をより再現した解析を実施することで、湧水量低下がさらに進んだ際の海底トンネルに与える影響等について検討を行うことが重要と考えている.

#### 参考文献

- 1) 土谷幸彦,倉川哲志,工藤健,小西真治,小島芳之,東畑郁夫:海底トンネルの覆工の長期挙動と評価に関する研究,土木学会論文集 C,Vol.63,No3,pp.825-834,2007.
- 2) 西藤潤,丹生和宏,岸田潔,深沢成年:湧水量が低下する 海底トンネルの力学的安全性に関する基礎的研究,土 木学会論文集 F1(トンネル工学),Vol. 67,No. 3,pp. I 25-I 32,2011.
- 3) 深沢成年,小林寛明,張信一郎,三谷憲司,保田尚俊,朝倉俊弘:内空変位の長期計測と覆工応力計測に基づく 長大海底トンネルの健全性評価,土木学会論文集FI(トンネル工学), Vol. 72, No.1,pp.1-10,2016.
- 4) 日本鉄道建設公団札幌工事事務所:青函トンネル維持管理業務資料,1998.3

(2016.8.5 受付)

# MECHANICAL BEHAVIOR OF THE LINING DUE TO THE PERMEABILITY REDUCTION IN THE UNDERSEA TUNNEL SURROUNDING GROUND

# Naritoshi FUKAZAWA, Ryo KASHIWAGI and Jun SAITO

In Seikan Tunnel, underground seepage water have been decreased year by year, but the inner space displacement is gradually larger. To examine the relevance of the behavior of the lining and the permeability decrease of the surrounding ground, the tunnel over the future there is a need to clarify the soundness. In this paper, We are permeability changes in the surrounding ground has been analyzed for the effects on tunnel. It has confirmed that the mechanical behavior of the lining shows almost the same tendency as the result of measurement.